

Ордена Трудового Красного Знамени
АГРОФИЗИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

ТОЛСТОГУЗОВ
Олег Викторович

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ
АГРОФИТОЦЕНОЗОВ НА ОСУШЕННЫХ ЗЕМЛЯХ В УСЛОВИЯХ
НЕДОСТАТОЧНОЙ АЭРАЦИИ ПОЧВ

Специальность: 06.01.03 – агропочвоведение,
агрофизика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
1992

Работа выполнена в Агрофизическом ордена Трудового Красного знамени научно-исследовательском институте и Институте биологии Карельского ЦН Российской АН.

Научный руководитель - профессор, доктор технических наук Р.А.Полуэктов.

Официальные оппоненты - доктор физико-математических наук Б.Г.Заславский, кандидат физико-математических наук Б.Б.Федорович.

Ведущая организация - Государственный гидрологический институт.

Защита состоится <<19>> марта 1992 г. в << >> ч. на заседании Специализированного совета Д 020.21.01 в Агрофизическом научно-исследовательском институте по адресу:

195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Агрофизического научно-исследовательского института.

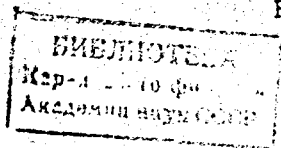
Автореферат разослан <<10>> февраля 1992 г.

Отзыв в 2-х экземплярах, заверенный гербовой печатью учреждения, просим направлять по адресу:

195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14, АФИ.

Ученый секретарь
Специализированного совета
доктор биологических наук

Н.В.Архипов



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последнее время в сельскохозяйственной биологии и агрономических науках активно разрабатываются проблемы биологической и агрономической устойчивости посевов культурных растений к различным стрессам. Особый интерес представляет исследование агрономической устойчивости к неблагоприятным условиям, обусловленным нарушением газообмена в корнеобитаемой зоне почвы. Аэрация почв является важным фактором агротехнологий. Ухудшение аэрации обусловлено неэффективностью действия осушительной дренажной сети, которая не всегда спасает естественные агроценозы и посевы на гидроморфных и полугидроморфных почвах от избыточного увлажнения. Переувлажнение пахотного горизонта обусловлено воздействием комплекса искусственных и естественных факторов, а именно: заболоченностью территории и геоморфологическими и гидрологическими особенностями ландшафтов. Явление периодического затопления характерно для сельскохозяйственных земель Карелии и других регионов Российской Федерации.

Принятие технологических решений ввиду сложности агроэкосистем требует создания информационного обеспечения, весьма эффективным инструментарием которого является имитационное моделирование. К настоящему времени в теории и практике моделирования продуктивности агроценозов уже получены определенные результаты. Во-первых, сформулирована система концепций и построен ряд моделей, формализующих механизмы продуцирования органического вещества в растениях и процессы формирования урожая. Во-вторых, построены модели, учитывающие влияние различных неблагоприятных условий на рост и развитие растений, как то: дефицита влаги, болезней, заморозков и др. Тем не менее, компьютерные модели, которые бы описывали поведение системы "посев-почва" в условиях затопления пахотного горизонта и ухудшения аэрации корнеобитаемой зоны, пока ни концептуально ни алгоритмически не разработаны.

Целью работы является создание модели продуктивности сеянных агрофитоценозов на полугидроморфных почвах. Специфика модели состоит в учете геогидрологических особенностей осушенных почв и сопряжении этих свойств с агрономической

устойчивостью посевов.

Для достижения поставленной цели необходимо было выполнить следующие задачи:

разработать концепцию формализованного описания явления затопления в рамках современной методологии моделирования продукционного процесса,

разработать алгоритмы, имитирующие реакцию посевов на нарушение газообмена в почве и динамику воздушного режима почв и газообмена корневой системы,

осуществить сопряжение созданных алгоритмов с базовой комплексной моделью продукционного процесса (МПП), разработанной в Агрофизическом институте под руководством Р.А.Полуэктова,

программно реализовать специализированную МПП, полученную на основе базовой модели, и провести компьютерные эксперименты с МПП, адаптированной к реальному агрообъекту.

Научная новизна выполненной работы заключается:

в новой постановке задачи, а именно в учете особых условий функционирования исследуемой системы,

в привлечении неиспользовавшейся ранее компьютерной технологии для решения аналогичных агроэкологических проблем.

В связи с этим к научным результатам диссертационной работы относятся:

разработка алгоритма, имитирующего совместный влаго- и воздухоперенос, и алгоритма, описывающего миграцию компонента движущихся почвенных фаз (кислорода) по почвенному профилю с учетом поглощения его корнями;

создание версии МПП для злаковых многолетних трав, в которой моделируется реакция растений на затопление корневобитаемой зоны почвы;

разработка информационного обеспечения модели и системы управления МПП и ее отдельных модулей в рамках единого автономного программного комплекса.

Практическое значение работы заключается в том, что разработанные алгоритмы включены в виде отдельных модулей в комплексную МПП. В результате существенно повысилась эффективность МПП, расширилась область ее применения. Проведение

компьютерных экспериментов с МПП средствами интегрированной проблемно-ориентированной системы управления позволяет проводить комплексную агроэкологическую оценку почвенных ресурсов реального агроландшафта или агроэкосистемы в рамках конкретной исследовательской программы или проектного задания.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы были доложены на научно-производственной конференции "Эколого-экономические проблемы развития территориальных АПК" (Калинин, 1989 г.); на конференциях молодых ученых "Актуальные проблемы биологии и рациональное природопользование" (Петрозаводск, 1989, 1990 г.); на научно-организационной конференции МС ВОП "Современные проблемы почвоведения и агрохимии" (Ташкент, 1990 г.); на Всесоюзной научной конференции молодых ученых "Проблемы охраны окружающей среды Севера" (Мурманск, 1990 г.); на Всесоюзной школе-конференции молодых ученых "Экологические проблемы в почвоведении и земледелии" (Курск, 1991 г.); на рабочем совещании "Проблемы математического моделирования в окружающей среде и экологии" (Пущино, 1991 г.); на семинарах лаборатории математического моделирования агроэкосистем Агрофизического НИИ (Санкт-Петербург, 1987-1991 гг.) и семинарах Института биологии Карельского НЦ РАН (Петрозаводск, 1987-1991 гг.); на заседаниях Карельского отделения ВОП (Петрозаводск, 1987-1991).

Публикации. По теме диссертации имеется 8 публикаций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитированной литературы, включающего 219 наименований, в том числе 91 работу иностранных авторов.

Объем диссертационной работы составляет 173 страницы, 27 рисунков, 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе изложены теоретические и методические предпосылки имитационного моделирования продукционного процесса многолетних злаковых культур, выращиваемых на осушенных почвах в условиях недостаточной аэрации почв.

При затоплении корнеобитаемой зоны происходит нарушение

корневого газообмена. Вследствие этого снижаются интенсивности различных физиологических процессов, а именно: фотосинтеза, транспирации, поглощения влаги и элементов минерального питания и др. Параметром внешней среды, регулирующим функционирование подсистемы "растение" в условиях кратковременного затопления, по всей вероятности, является концентрация кислорода в почве. Корневые клетки вследствие дефицита кислорода, определяющего энергетическое голодание, испытывают стресс. Стресс проявляется в нарушении корневого дыхания и депрессии метаболизма. Снижение эффективности дыхания приводит к перерасходу запасов ассимилятов. Вследствие нарушения дыхательной цепи накапливаются различные промежуточные продукты, наиболее токсичным из которых и плохо включаемым в метаболизм, является этанол. При затоплении гибнет апикальная меристема корня и вследствие этого существенно изменяется соотношение гормонов в растении. Это приводит к закрытию устьиц и торможению потоков ассимилятов из листьев в корни.

С учетом требований, выдвигаемых имитационным моделированием к точности, устойчивости решений и детализации моделируемых процессов, определен концептуальный алгоритм влияния корневого анаэробнозиса на рост растений. Так как в подсистеме "растение" происходит нарушение всех основных физиологических функций, то в качестве переменной состояния выбран индекс стресса (a_{str}), который является интегральным показателем ухудшения среды корневых клеток. Он определяется концентрацией кислорода в почве и корневых тканях.

В данной главе показано, что для моделирования переноса газа по почвенному профилю применим термодинамический формализм. Кислород является компонентом движущихся почвенных фаз (влаги и воздуха). Его поток определяется уравнением конвективной диффузии. В соответствии с известной методикой решения задач переноса вещества в изотермических условиях система уравнений относительно искомых функций плотности фаз $\rho_k(x, t)$ и концентраций газа $C_k(x, t)$ выглядит следующим образом:

$$-\frac{\partial \rho_{k,m}}{\partial t} = - \langle \text{div} q_k \rangle, \quad \frac{\partial C_{k,m}}{\partial t} = - \langle \text{div} J_k \rangle, \quad (m=e, w, k=a, w),$$

где k - индекс фазы, ε - порозность азрации, w - объемная влажность почвы, q_k - поток движущейся фазы, J_k - поток компонента фазы, $\langle \cdot \rangle$ - среднее по элементарному физическому объему. Решению предложенной системы уравнений посвящена вторая глава. В первой главе проведен анализ уравнений. Показано, что в случае переноса кислорода воздушной средой вклады конвективной и релаксационной частей являются величинами примерно одного порядка. В случае переноса жидкостью при наличие потоков между слоями почвы преобладает эффект конвекции.

Показано, что метод расчета скорости воздушной фазы зависит от предпосылок, положенных в основу физической модели.

Во второй главе представлена модель для расчета динамики содержания кислорода в почве и корнях. Модель включает в себя иерархическую систему алгоритмов, имитирующих двухфазную фильтрацию в почвенной среде, продольную диффузию газа как компонента движущихся фаз (влаги и воздуха), рассеяние газа, описанное в виде диффузии в горизонтальном направлении, и поглощение кислорода корнями растений. На рис. 1 представлена схема алгоритма предложенной модели. В данной модели учтено влияние почвенной структуры, а именно: распределение пор по размерам, наличие тупиковых пор и др. Она определяет воздухопроводность почвы, динамику водного и воздушного режимов. Принято считать, что движение фаз проис-



Рис. 1. Схема алгоритма.

ходит только по извилистым сквозным порам. Содержащиеся в тупиковых порах дополнительные фазы непосредственно не участвуют в фильтрации. Между мобильной и немобильной (застойной) воздушными фазами происходит массообмен. В соответствии с выбранной физической моделью получено выражение для вычисления скорости потока воздушной фазы:

$$u_a = -K_a dsp_1 \left(\partial P_a / \partial x - dsp_2 \right), \quad (1)$$

где $dsp_{1,2}$ - корректирующие параметры диссипации, P_a - потенциал давления воздушной фазы, K_a - воздухопроводность.

Считается, что воздух движется одновременно с влагой, в виде двухфазной фильтрации. Движение влаги определяется ее энергетическим состоянием, т.е. градиентом потенциала тензисметрического давления (P_w). При движении влаги воздух сжимается. В результате колебаний плотности воздуха создается поле пневматического потенциала (∂P_a), которое определяет направление и скорость движения воздуха. Кроме того, на скорость движения воздуха влияет ориентация структуры дисперсной среды, температура почвы и степень заполненности почвенных пор водой. Поле пневматического потенциала влияет на поле потенциала давления почвенной воды в соответствии с уравнением обратной связи

$$P_w = \partial P_a + P_{ks}(w), \quad \partial P_a = P_a - P_{atm},$$

где P_{ks} - капиллярно-сорбционный потенциал, P_{atm} - атмосферное давление.

В данной главе представлено решение системы уравнений влаго- и воздухопереноса. Уравнения построены в соответствии с известной теорией фильтрации влаги в ненасыщенных почвогрунтах и теорией многофазной фильтрации в дисперсной среде с использованием формулы (1). Смешанная задача решена разностно-итерационным методом. Для аппроксимации исходной задачи воспользовались следующей разностной схемой:

$$A_{j+1} (B_{j+1} P_{j+1} - B_j P_j) - \partial Q_{j+1}^P = P_{j+1}^P, \quad j=1, \dots,$$

$$A_j = \begin{pmatrix} A_{1j} \\ A_{2j} \\ A_{3j} \end{pmatrix}, \quad B_j = \begin{pmatrix} \epsilon \\ s_j \\ \epsilon_j \end{pmatrix}, \quad P_j = \begin{pmatrix} P_w^j \\ P_a^j \\ P_{stj} \end{pmatrix}, \quad \partial Q_j^P = \begin{pmatrix} \partial Q_w^j \\ \partial Q_a^j \\ 0 \end{pmatrix}, \quad P_j^P = \begin{pmatrix} P_w^j \\ P_{fs}^j \\ P_{sf}^j \end{pmatrix}.$$

где $P_{kj} = (P_{k1j})$, $Q_{kj} = (q_{k1j} - q_{k1-1j})$, ($k=w, a, st$), $\varepsilon_j = (\varepsilon_{1j})$, $F_{wj} = (h_1 F_{w1j})$, $F_{fsj} = (h_1 F_{fs1j})$, $F_{stj} = (F_{st1j})$, $i=1, \dots, N$, $j=1, \dots$ - мерные вектора; E - единичная матрица; A_{1j}, A_{2j}, A_{3j} - матрицы, имеющие вид:

$$A_{1j} = (\mu_{1j} h_1 / \tau), \quad A_{2j} = \left[(1-\theta) h_1 M (RT_{1j} \tau)^{-1} \right], \quad A_{3j} = \left[\theta M (RT_{1j} \tau)^{-1} \right].$$

В уравнениях используются следующие обозначения: k - индекс почвенной фазы, i - номер почвенного слоя, j - номер временного шага модели, h_1 - толщина i -слоя, τ - временной шаг модели, θ - доля тупиковых пор, M - молярная масса воздуха, R - универсальная газовая постоянная, T - абсолютная температура почвы, P_{st} - давление немобильной воздушной фазы, μ - дифференциальная влагоемкость, F_w - стоковая функция уравнения влагопроводности, F_{fs} - интенсивность фазового перехода.

Итерационный процесс последовательных приближений организован следующим образом

$$P_{wj+1}^{(1)} = P_{wj}^{(s)}, \quad P_{wj+1}^{(s)} = P_{ks} (w_{j+1}^{(s)}) + P_{aj+1}^{(s-1)} - P_{atm}.$$

$$P_{wj+1}^{(s+1)} = T_w^{(s+1)} \left[P_{wj+1}^{(s)} + \delta \tau F_{wj+1}^{(s)} \right],$$

$$P_{aj+1}^* = P_{aj+1}^{(s-1)} \left(\delta w_{j+1}^{(s+1)} \left(\varepsilon_j - \delta w_{j+1}^{(s+1)} \right)^{-1} + E \right),$$

$$P_{aj+1}^{(s+1)} = T_a^{(s+1)} \left[P_{aj+1}^* + \delta \tau F_{fsj+1}^{(s)} \right], \quad \delta w_{j+1} = w_{j+1} - w_j,$$

где $w_j = (w_{1j}), \dots, i=1, \dots, N$, $j=1, \dots$ - мерный вектор. Индекс s означает номер итерации. Система линейных уравнений относительно P_k ($k=a, w$) решается методом потоковой прогонки. Сходимость и устойчивость решения задачи достигается при выборе параметра $\delta \tau$ равного 1 ч.

Моделирование переноса кислорода в почве базируется на описании процессов конвективно-дисперсионного переноса, молекулярной диффузии и процессов поглощения корнями растений, почвенным комплексом и микроорганизмами. Для расчета общей концентрации кислорода в почве предложена следующая формула:

$$C_j = C_{(1)j} \varepsilon_j (1-\theta) + \text{sgn} \left(P_{wj} - P_{wj}^{as} \right) \left(C_{(1)j} \varepsilon_j \theta + C_{(2)j} w_j \right) +$$

$$+ (1 - \text{sign}(P_{wj} - P_{wj}^{\text{ас}})) (C_{(22)j} w_{\text{max}}^{\text{ас}} \theta + C_{(2)j} w_j (1 - \theta)).$$

$$\text{sign}(P_{wj} - P_{wj}^{\text{ас}}) = \begin{cases} 0, & P_{wj}^{\text{ас}} > P_{wj}, \\ 1, & P_{wj} < P_{wj}^{\text{ас}}, \end{cases}$$

где $C_j = (C_{1j})$, $C_{(k)j} = (C_{(k)1j})$, $1=1, \dots, N$, $j=1, \dots$ - мерные вектора; $C_{(k)}$ ($k=1, 2, 11, 22$) - концентрация кислорода, соответственно, в мобильной газовой фазе, в мобильной жидкой фазе, в немобильной газовой фазе, немобильной жидкой фазе; $w_{\text{max}}^{\text{ас}}$ - влажность насыщения агрегата, $P_w^{\text{ас}}$ - водный потенциал, при котором происходит полное насыщение агрегатов влагой.

Считается, что перенос кислорода по почвенному профилю осуществляется только по сквозным порам. Застойные зоны, распределенные равномерно вокруг капилляров, представляют собой зону рассеяния частиц со стационарным характерным масштабом $l = \bar{r} + \bar{r}_{\text{ас}}$ (\bar{r} , $\bar{r}_{\text{ас}}$ - средние радиусы почвенных частиц и агрегатов). Алгоритм, рассчитывающий функцию рассеяния, моделирует процессы диффузии газа через окружающие корни водную пленку и эндодерму, потребления кислорода корневыми клетками и поглощения микроорганизмами.

Смешанная задача решена разностно-итерационным методом. Для аппроксимации исходной задачи воспользовались следующей разностной схемой:

$$Z (M_{j+1} C_{j+1} - M_j C_j) - \delta Q_{j+1}^C = F_{j+1}^C, \quad j=1, \dots,$$

$$Z = \begin{pmatrix} Z_1 \\ Z_1 \\ Z_2 \\ Z_2 \end{pmatrix}, \quad M_j = \begin{pmatrix} \varepsilon_j \\ w_j \\ \varepsilon_j \\ w_j \end{pmatrix}, \quad C_j = \begin{pmatrix} C_{1j} \\ C_{2j} \\ C_{11j} \\ C_{22j} \end{pmatrix}, \quad \delta Q_j^C = \begin{pmatrix} \delta Q_{1j}^C \\ \delta Q_{2j}^C \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad F_j^C = \begin{pmatrix} F_{1j} \\ F_{2j} \\ F_{11j} \\ F_{22j} \end{pmatrix},$$

где $\delta Q_{(k)j}^C = (q_{(k)1+1j}^C - q_{(k)1j}^C)$, ($k=1, 2$). $F_{1j} = (h_1 f_{1j}^{(1)})$, $F_{2j} = (h_2 f_{2j}^{(2)})$, $F_{11j} = (f_{11j}^{(11)})$, $F_{22j} = (f_{22j}^{(22)})$, $1=1, \dots, N$, $j=1, \dots$ - мерные вектора; Z_1, Z_2 - вектора-функции, имеющие вид:

$Z_1 = ((1-\theta)h_1 \tau^{-1})$, $Z_2 = (\theta \tau^{-1})$. В уравнениях используются следующие обозначения: k - индекс почвенной фазы, $q_{(k)}^C$ - конвективно-дисперсионный поток газа в соответствующей почвенной

фазе, $f^{(k)}$ – суммарные функции рассеяния.

Итерационный процесс построен следующим образом:

$$C_{j+1}^{(1)} = C_j, \quad C_{j+1}^{(s+1)} = C_{j+1}^{(s)},$$

$$M_{j+1}^{(s+1)} C_{j+1}^{(s+1)} = T_c^{(s+1)} \left[M_{j+1}^{(s)} C_{j+1}^{(s)} + \delta t F_{j+1}^{(s)} \right].$$

Критерием выбора параметра итерации δt являлось обеспечение сходимости итерационного процесса и устойчивости разностной схемы. Этим условиям удовлетворяет значение $\delta t = 1$ ч.

Проверка разработанных алгоритмов по экспериментальному материалу Макэфи (McAfee et al., 1989) показала удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных данных.

В третьей главе представлен алгоритм, позволяющий имитировать завядание и гибель растения при недостаточной аэрации почв. При имитации кратковременного затопления корнеобитаемого горизонта в функциональной структуре подсистемы "растение" посредством управляющих параметров $\{a_i\}$ производится ряд последовательных изменений. В первую очередь моделируется нарушение процесса дыхания. С помощью регуляции величины устойчивого сопротивления (r_{st}) ограничиваются процессы фотосинтеза и транспирации. С помощью регуляции проводимости эндодермы снижается поглощение ионов корневой системой. В результате последовательного действия алгоритма моделируется также перераспределение (в ущерб ростовым процессам) образовавшихся ассимилятов.

Индекс стресса a_{str} определяется количеством поглощенного корневыми тканями кислорода (Q_r) и по смыслу представляет собой степень дефицитности кислорода. Его величина непосредственно влияет на параметры a_{en} и a_{tx} . Параметр a_{en} определяет степень дефицита биологически полезной энергии. Гликолитический путь дыхания менее эффективен и потому требует больше затрат углеводов на дыхание. Степень токсичности среды a_{tx} связана с действием накапливаемых в результате нарушения дыхательного цикла различных вредных веществ, наиболее токсичным из которых является этанол. Коэффициент a_{gr} связан с нарушением функционирования гормональной системы растений. На представленном рисунке (см. рис. 2) показан алгоритм влияния стресса на физиологические процессы. Иско-

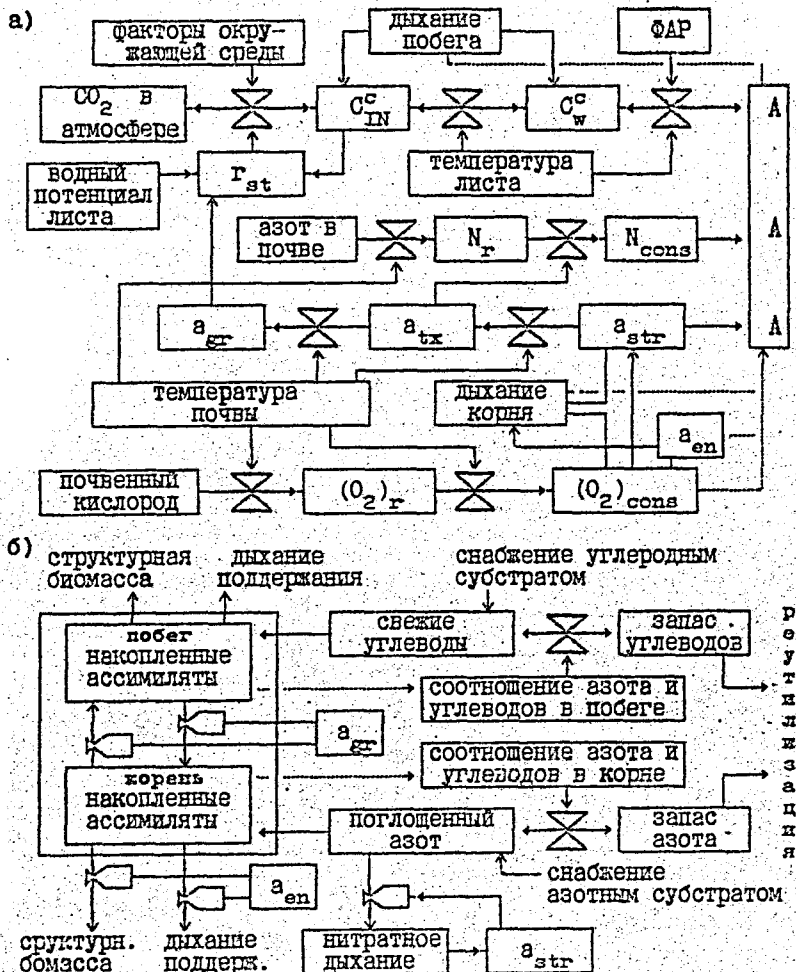


Рис. 2. Индекс стресса и функциональная структура растения.

а) схема CO_2 -газообмена листа, O_2 -газообмена корня;

б) распределения углеводов, азота и ассимилятов.

C_{IN}^c , C_w^c - концентрация CO_2 в межклеточном пространстве и растворе, N_r - азотсодержащие вещества в корне, N_{cons} - поглощенный азот, $(\text{O}_2)_r$ - кислород в корне, $(\text{O}_2)_{\text{cons}}$ - поглощенный кислород, r_{st} - устьичное сопротивление, А - фотосинтез и другие физиологические процессы.

ные элементы $\{a_{(1)}\}$ рассчитываются на основании следующей системы уравнений:

$$a_{str} = 1 - Q_r csm, \quad 0 < a_{str} < 1, \quad 0 \leq Q_r \leq csm^{-1},$$

$$csm = f(dbms_r, bms_r, T),$$

$$da_{tz}/dt = \xi_{in}\varphi(T)a_{str} - \xi_{do}a_{tz}, \quad \xi_{do} = \varphi(T)\xi_0,$$

$$da_{gr}/dt = \xi_{gr}a_{tz} - \xi_{ut}a_{gr},$$

где $dbms_r$ и bms_r — прирост и абсолютное значение сухой биомассы растения, $\varphi(T)$ — зависимость от температуры, $\xi_{(1)}$ — параметры, определяющие скорости образования и распада токсичных продуктов анаэробного дыхания.

Наряду с алгоритмом, описывающим действие стресса, в модель включен алгоритм, имитирующий адаптивную реакцию растений — нитратное дыхание (см. рис. 2 б). Часть нитратов в растении используется в качестве акцепторов электронов. Вследствие уменьшения количества поглощенного азота происходит увеличение оттока углеводов из листьев в корни. Поэтому надземная часть растения в стрессовых условиях начинает испытывать нарастающий дефицит ассимилятов. В то же время ассимилянты, поступившие в корень, в основном расходуются не на рост, а на дыхание.

Для проверки построенных алгоритмов использовались экспериментальные данные (Одуманова-Дунаева, 1989). Результаты проверки показали удовлетворительное совпадение расчетов и экспериментального материала (см. рис. 3).

В четвертой главе представлены описания специализированной МПП, созданной на основе базовой комплексной модели, и Информационной Системы (ИС).

В предлагаемой специализированной модели формализуется продуцирование органического вещества посевом многолетней злаковой культуры, выращиваемой на осушенных почвах. МПП представлена динамической структурой блочного типа. Состоит из следующих блоков: блока погоды, блока микроклимата, блока водного режима почвы и растительного покрова, блока водно-воздушного режима, блока теплового режима, блока фотосинтеза и фотодыхания, блока корневого газообмена и стресса, блока роста, развития и распределения ассимилятов. Блоки построены

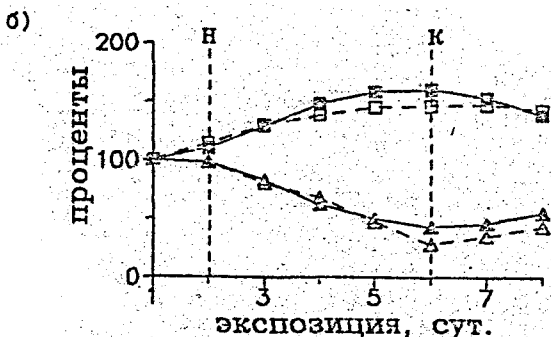
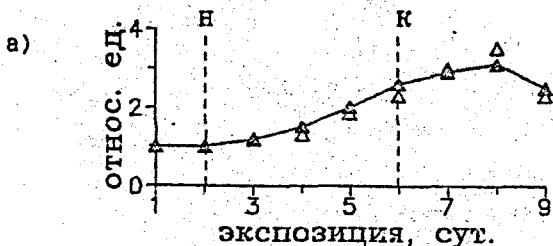


Рис. 3. Динамика транспирации и фотосинтеза.

а) Динамика относительной транспирации томатов (ОТ). Величина ОТ равна отношению интенсивностей транспирации растения, находящегося в аэробных условиях, и растения, находящегося в условиях корневой аноксии.

б) Динамика фотосинтеза контрольных и растений, находящегося в аэробных условиях, и растения, находящегося в условиях корневой аноксии. По оси ординат — интенсивность угликислотного газообмена за сутки (проценты к исходному уровню).

Δ, □ — экспериментальные данные;

Δ, □ — расчет по предложенному алгоритму;

▲, ▲ — интенсивность угликислотного газообмена при аноксии корней,

■, ■ — интенсивность угликислотного газообмена при нормальной аэрации.

Н — начало подачи азота в корневую камеру, К — момент восстановления продува камеры нормальным воздухом.

по унифицированной динамической схеме, описывающей физиологические процессы и процессы энерго- и массообмена в почве и посеве. Синхронизация блоков организована по биологическому времени (суммам накопленных температур). МПП имитирует ход вегетационного процесса посева от фазы всходов до полного созревания.

Средством организации, анализа и представления данных и алгоритмов является работающая в диалоговом режиме многоцелевая, интегрированная проблемно-ориентированная Информационная Система. Система управления ИС предназначена для проведения методом компьютерного эксперимента всесторонней экспертной оценки агрономического потенциала агроэкосистем, генетического потенциала сельскохозяйственных культур и текущего состояния агроклиматических и почвенных ресурсов. ИС состоит из следующих автономных частей (см. рис. 4):

интегрированной интерактивной системы управления;

базы данных почв (БД), информационно привязанной к ландшафтам;

графической базы данных (ГБД) для хранения и обработки графических растровых изображений почвенных и других карт;

базы алгоритмов, в которую входят исполнимые модули для расчета динамики почвенных процессов (влаго- и воздухопереноса) в режиме реального времени; модуль, имитирующий процесс продуцирования органического вещества растениями в течение вегетационного сезона с учетом темпа роста растений и хода онтогенеза; интегрированная система управления модулями и система их информационного обеспечения.

В информационное обеспечение модулей входят автономные обслуживающие системы, а именно: система управления сценариями погоды, система агрофизического обеспечения (САО), система обеспечения МПП (СОМ). Задачей САО является:

ввод, организация и представление следующих данных: плотности, порозности почвенных горизонтов, гранулометрического состава и параметров, характеризующих водно-физические свойства;

расчет в рамках автономной системы функции влагопроводности, основной гидрофизической характеристики и функции распределения пор по размерам.

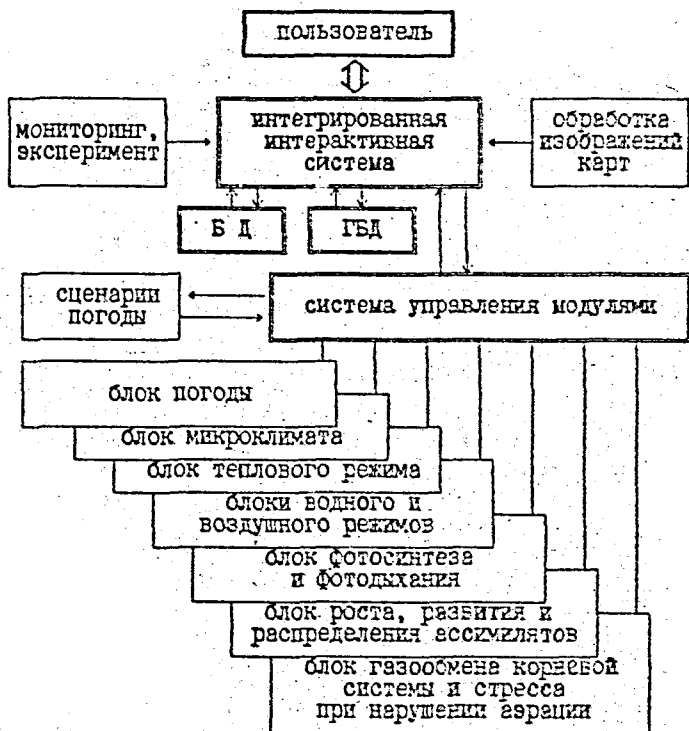


Рис. 4. Блок-схема Информационной Системы.

Задачей СОМ является формирование вектора начального состояния для расчета продукционного процесса в течение вегетационного сезона.

С целью проверки допустимости применения предложенных алгоритмов в комплексной МПП была проведена серия полевых экспериментов на реальном агрообъекте и компьютерных экспериментов на МПП. Результаты машинных экспериментов показали хорошее совпадение расчетных и полевых данных (см. рис. 5).

Для определения потери урожая, обусловленной кратковременным затоплением пахотного горизонта, был проведен имитационный эксперимент на МПП с отключенным блоком стресса. Результаты опыта показаны на рис. 5 (б) штриховой линией. Проведение компьютерных экспериментов позволяет оценить агрономический потенциал агрофитоценозов.

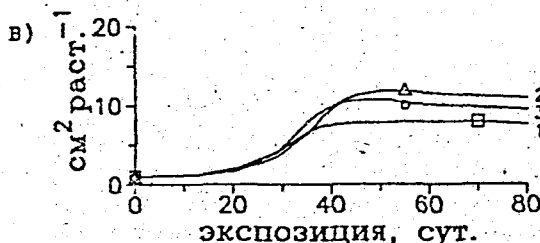
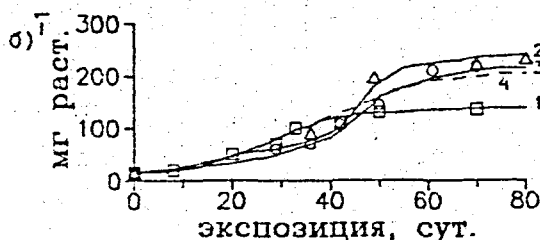
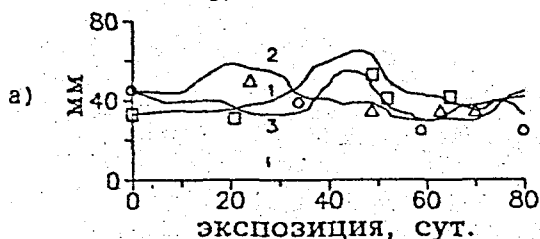


Рис. 5. Данные полевых и компьютерных экспериментов, проведенных с реальным агрообъектом, находящимся в Карелии.

а) Динамика влагозапаса (мм) пахотного горизонта поверхностно-глееватой глинистой почвы в течение вегетационных сезонов 1987-1989 гг.

б) Динамика формирования урожая тимофеевки луговой (мг раст.⁻¹) в 1987 - 1989 гг.

в) Динамика площади листовой поверхности (см² раст.⁻¹).

Δ, □, ○ - данные полевых экспериментов,

1, 2, 3, 4 - расчет по имитационной модели,

Δ, 1, 4 - сезон 1987 г.; Δ, 2 - сезон 1988 г.; ○, 3 - сезон 1989 г.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.

1. Разработана концепция формализованного описания явления затопления в рамках современной методологии моделирования производственного процесса.

2. Разработаны динамические модели совместного влаго- и воздухопереноса и миграции кислорода по почвенному профилю с учетом поглощения кислорода корнями.

3. Разработаны модели газообмена корневой системы и стрессовой реакции посевов, вызванной нарушением газообмена в почве.

4. Разработанные модели сопряжены с базовой комплексной МПП в соответствии с требованиями, предъявляемыми к точности и устойчивости решений и к детализации формализуемых процессов. Осуществлена перестройка базовой МПП в соответствии с условиями поставленной задачи, а именно:

кроме периодичности малого цикла развития (т.е. смены фаз) учтено изменение возрастного состояния многолетних злаковых трав,

проведена корректировка модели роста и развития в соответствии с требуемой детализацией исследуемых процессов.

5. Разработанные модели реализованы в виде программных модулей.

6. Разработана Информационная система, включающая в себя систему управления МПП и отдельными модулями, позволяющая проводить компьютерные эксперименты.

7. Созданная на основе базовой модели специализированная МПП позволяет имитировать ход вегетационного процесса от фазы всходов до полного созревания и производить агрономическую оценку текущего состояния посевов многолетних злаковых трав при различных агрометеорологических условиях, в том числе и при кратковременном затоплении пахотного горизонта.

Показана применимость предложенной МПП для реального агрообъекта, находящегося в Карелии. Предложен способ оценки ущерба, наносимый агрофитоценозам при кратковременном затоплении пахотного горизонта.

Публикации по теме диссертации:

1. Агроклиматическая оценка продуктивности лугового агроценоза на осушенных торфяных почвах // Комплексное изучение продуктивности агроценозов. - Пущино, 1987. - С. 128-135 (в соавторстве).

2. Экологическая оптимизация антропогенных почв Карелии // Науч. конф. "Эколого-экономические проблемы развития территориальных АПК": Тез. докл. - Калинин, 1989. - С. 81-82.

3. Моделирование роста травы на осушенных землях // Респ. конференция молодых ученых "Актуальные проблемы биологии и рациональное использование природных ресурсов Карелии": Тез. докл. - Петрозаводск, 1989. - С. 90-92.

4. Имитация развития растений в условиях недостаточной аэрации почв // Респ. конф. молодых ученых "Актуальные проблемы биологии и рациональное природопользование": Тез. докл. - Петрозаводск, 1990. - С. 102-104.

5. Моделирование роста растений при избыточном увлажнении почв // Всес. науч. конф. молодых ученых "Проблемы охраны окружающей среды Севера": Тез. докл. - Мурманск, 1990. - С. 34-35.

6. Оценка агрономической устойчивости посевов трав при недостатке почвенного кислорода // Всес. школа-конф. молодых ученых "Экологические проблемы в почвоведении и земледелии": Тез. докл. - Курск, 1991. - С. 73-74.

7. Моделирование роста травы при избыточном увлажнении почв // Математическое и программное обеспечение задач управления агроэкосистемами. - Л. - 1990. - С. 3-12.

8. Моделирование продукционного процесса растений в условиях недостаточной аэрации почв // Доклады ВАСХНИЛ. - 1992. - № 3 (в соавторстве).